

LED – Das Licht der Zukunft

Streubel, Klaus

Veröffentlicht in:
Jahrbuch 2010 der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft, S.169-178



J. Cramer Verlag, Braunschweig

LED – Das Licht der Zukunft

KLAUS STREUBEL

Leiter Forschung und Entwicklung, Osram GmbH
Werner-von Siemens-Straße 6, 86159 Augsburg

Die LED Revolution

Die Abkürzung „LED“ steht für Licht Emittierende Diode, oder kurz Leuchtdiode. Dieses kleine Bauelement mit dem unscheinbaren Namen ist gerade dabei, sich in unserer Gesellschaft einen wichtigen Platz zu erobern. Spätestens seit dem Verbot der Glühlampe ist die LED zu einem regelrechten Medienstar und technologischen Hoffnungsträger aufgestiegen. Als integraler Bestandteil von Mobiltelefonen, Laptops, Tablett-PCs, Flachbildschirmen und vielen anderen digitalen Spielzeugen unseres modernen Lebens, ist die LED aus unserem Alltag nicht mehr wegzudenken. Häufig hat gerade sie die Miniaturisierung dieser Anwendungen erst ermöglicht und ihnen damit zum Erfolg verholfen. Eines der besten Beispiele für den Siegeszug der LED ist das Prunkstück deutscher Ingenieurskunst, das Automobil. Ursprünglich als winzige, einfarbige Lichtquelle für Signallämpchen im Armaturenbrett eingesetzt, hat die LEDs mittlerweile den kompletten Innenraum eines modernen Fahrzeugs erobert und ist dort zu hunderten vertreten. Mit steigender Effizienz und Helligkeit fand sie später auch den Weg in die Außenbeleuchtung, wo sie in Rück-, Brems-, Nebel- und Blinklichtern souverän ihre Stärken ausspielt. Mit weißen LEDs im Tagfahrlicht ist es einigen Autodesignern gelungen, der Frontpartie ihrer Modelle ein Gesicht und ihrer Marke eine unverwechselbare Identität zu geben. Die letzte Domäne der Autobeleuchtung, das Abblend- und Fernlicht, ist bei den ersten Oberklassemodellen ebenfalls schon mit LEDs besetzt, so dass es nur eine Frage der Zeit scheint, bis das gesamte Licht eines Automobils von einer LED erzeugt wird.

Richtig erfolgreich geworden sind LEDs mit den Mobiltelefonen. In den ersten Jahren waren nur farbige LEDs für die Tastatur- und Displaybeleuchtung verfügbar, aber schon diese brachten ideale Voraussetzungen mit: klein, robust und effizient. Heute dominieren überwiegend weiße LEDs das Mobiltelefon,

* Der Vortrag wurde anlässlich der Verleihung der Gauß-Medaille durch die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft am 30.04.2010 gehalten.

nicht nur in der Beleuchtung des Gerätes sondern auch z. B. in den Blitzlichtern für die eingebaute Kamera. Die allerneuesten Telefone besitzen sogar schon einen eingebauten LED Projektor, mit dem man sich aufgenommene Fotos oder Filme zusammen mit Freunden ansehen kann. Viele Experten gehen davon aus, dass sich der eingebaute Miniprojektor genauso wie die integrierte Kamera, zu einem Standard im Handy etablieren wird. Die nächste, große LED Applikation ist die Hinterleuchtung von LCD-Bildschirmen in mobilen Computern und Fernsehgeräten, deren Markt in den letzten Jahren regelrecht explodiert ist. Für all diese Verbraucherprodukte wurden 2010 geschätzte 80 Milliarden LEDs verbaut [1]. Die damit verbundene Hochskalierung der weltweiten Fertigungskapazität führt unweigerlich zu stetig sinkenden Herstellungskosten. Damit wird die LED auch für sehr preissensitive Marktsegmente, wie z.B. die Allgemeinbeleuchtung interessant. Im Jahre 2010 wurden weltweit etwa 11 Milliarden Euro für die Allgemeinbeleuchtung ausgegeben. Analysten gehen davon aus, dass dieser Markt in den nächsten 10 Jahren auf 16 Milliarden Euro anwachsen wird. Dieses Wachstum wird aus der Durchdringung des Marktes mit LEDs und den damit verbundenen neuen Möglichkeiten der Beleuchtung kommen. Je nachdem, welche Annahmen man für die Marktentwicklung der klassischen Lichtquellen trifft, werden LEDs im Jahre 2020 mindestens 50% des Allgemeinbeleuchtungsmarktes ausmachen. Mutige Analysten halten sogar einen LED-Anteil von 80% für möglich [2].

Pioniere der LED Geschichte

Die Entdeckung des Phänomens der Elektrolumineszenz wird dem englischen Wissenschaftler Captain Henry Joseph Round zugeschrieben. 1907 beschrieb Round in einer kurzen, nur 24 Zeilen langen Notiz in der Zeitschrift *Electronic World* („A Note on Carborundum“) ein helles Glimmen, das er beim Anlegen einer Spannung an eine SiC Diode beobachtete. Round verbrachte einige Jahre in den USA bei der Firma Marconi, die später in finanzielle Schwierigkeiten geriet und ihn entlassen musste. In dieser Notlage bewarb er sich auch bei Thomas Edison, der sich bekanntermaßen mit der Vermarktung der Glühlampe in den Annalen bedeutender Innovationen verewigt hat. Edison wollte jedoch ihn nicht einstellen. Glücklicherweise fand Round dann doch noch eine Anstellung bei den New York Telephone Laboratories.

War Rounds Entdeckung eher zufälliger Natur, so arbeitete der russische Radio-techniker Oleg Vladimirovich Losev schon sehr systematisch mit Licht erzeugenden Dioden. Mitte der 20er Jahre entdeckte er, dass Dioden in Radioempfängern Licht produzierten, wenn sie von elektrischem Strom durchflossen wurden. Zwischen 1924 und 1941 veröffentlichte Losev seine Experimente in mehreren russischen, deutschen und britischen wissenschaftlichen Zeitschriften. Sein Artikel von 1927 in einer russischen Zeitschrift gilt als die erste Ver-

öffentlichung einer Licht emittierenden Diode. Trotzdem sollte es noch Jahrzehnte dauern, bis seine Entdeckung praktisch genutzt wurde. Im Januar 1942 starb Oleg Losev auf tragische Weise im Alter von nur 39 Jahren während der Belagerung von Leningrad.

1935 entdeckte George Destriau, ein Mitarbeiter von Marie Curie, die Emission von Licht bei Anlegen eines starken elektrischen Feldes an Zinksulfid. Das Material war versehentlich mit Kupfer verunreinigt. Destriau entwickelte aus seiner Entdeckung ein serienreifes Produkt: die Elektrolumineszenzfolie. Der Deutsche Heinrich Welker hatte in den 40er Jahren schließlich die Idee, dass sich durch Kombination von Elementen der III-ten und V-ten Hauptgruppe Materialien mit halbleitenden Eigenschaften herstellen lassen müssten. Welker übernahm später die Leitung des Siemens Forschungslabors in Erlangen, wo er zahlreiche synthetische III-V Verbindungen, darunter auch Galliumarsenid und Galliumphosphid, herstellen und untersuchen konnte. Heinrich Welker gilt als der Entdecker der III-V Halbleiter, die heute die Grundlage für alle optoelektronischen Bauelemente darstellen. Zu seinen Ehren vergibt Osram jährlich den Heinrich-Welker Award für herausragende Leistungen auf dem Gebiet der III-V Halbleiter.

Mit den neuen Halbleitermaterialien wurde zunächst an infrarot emittierenden Leuchtdioden gearbeitet. Die erste kommerziell verfügbare LED für sichtbares Licht entwickelte schließlich Nick Holoniak bei General Electric im Jahre 1962. Seither gilt Holoniak als „Vater der LED“. Seine LEDs waren mit Effizienzwerten um 0,1 Lumen pro Watt nur für sehr wenige Anwendungen brauchbar. Heute erreicht die Effizienz solcher LEDs ein Tausendfaches dieser Werte. Mit verschiedenen Halbleitermischungen war es bald möglich, LEDs in den Farben rot, gelb und grün herzustellen, doch für blaues Licht gab es fast 30 Jahre lang keine Lösung. Auf der Suche nach einem geeigneten Material dafür hatte man schon früh das System Gallium-Indium-Nitrid untersucht, dies aber nach vielen erfolglosen Versuchen, es zu dotieren, letztendlich aufgegeben. Vielmehr konzentrierte sich die überwältigende Mehrheit der internationalen Fachwelt auf den Verbindungshalbleiter Siliziumcarbid, auch wenn die damit fabrizierten LEDs nicht mehr als ein schwaches Glimmen zustande brachten. Umso größer war die Überraschung, als 1992 der japanische Physiker Suji Nakamura blaue und ultra-violette LEDs aus Galliumnitrid (GaN) präsentierte, die er bei der Firma Nichia entwickelt hatte. Damit wurde, angeführt vom Nichia Team, ein spannendes, weltweites Rennen um immer höhere Helligkeiten blauer LEDs ausgelöst. Innerhalb weniger Jahre wurde die Leistung roter LEDs eingeholt und schließlich sogar überholt. Nichia brachte seine erste blaue LED 1993 auf den Markt und hat seither seine Position als unangefochtener Marktführer erfolgreich verteidigt.

Unabhängig voneinander entstand gleichzeitig bei Nichia in Japan und am Fraunhofer Institut für Angewandte Festkörperphysik in Freiburg die Idee für

eine weiße LED. Die Freiburger Physiker Schlotter, Schmidt und Schneider sägten die Kunststoffkappe einer kommerziellen blauen LED ab und plazierten dort ein lichtkonvertierendes Material, das blaues Licht absorbiert und gelbes Licht abgibt. Bei richtiger Mischung von blau und gelb entsteht so weißes Licht. Die Idee wurde 1996 von den drei Forschern patentiert und stellt heute die Grundlage für fast alle weltweit produzierten weißen LEDs dar. Der Spiegel veröffentlichte dazu einen Artikel mit dem vielsagenden Titel „Vorne abgesägt“ [3].

LED Technologie

Die Effizienz einer LED wird von zwei wesentlichen Faktoren bestimmt: der Umwandlung von elektrischem Strom in Licht (interne Effizienz) und der Auskopplung des erzeugten Lichtes aus dem Inneren der LED (Extraktionseffizienz). Die interne Effizienz hängt entscheidend von der Qualität einer dünnen Kristallschicht ab, die man auf eine Kristallscheibe („Wafer“) aufwachsen lässt. Diese Schicht ist nur wenige Mikrometer dick und bestimmt später nahezu alle Eigenschaften der LED. Der Wafer selbst wird nur als mechanischer Träger benötigt. Das Aufwachsen einer Kristallschicht auf einen kristallinen Träger wird Epitaxie genannt und ist der Schlüsselprozess in der LED Herstellung. Die Steigerung der internen Effizienz ist im wesentlichen auf eine kontinuierliche Verbesserung der Epitaxieverfahren zurückzuführen. Die höchsten internen Effizienzen von deutlich über 90% erreicht man heute mit roten und infra-roten LEDs.

Neben der internen Erzeugung von Licht besteht eine weitere Herausforderung darin, das erzeugte Licht aus dem Halbleiter heraus zu bekommen. Aufgrund des hohen optischen Brechungsindex der III-V Materialien wird das Licht auf dem Weg nach außen an der Grenzfläche zur Luft nahezu vollständig in den Halbleiter zurückreflektiert. Ohne spezielle Tricks werden bei einer roten LED nur 2% des erzeugten Lichtes durch die Oberfläche an Luft ausgekoppelt. Der restliche Anteil von 98% wird im Inneren der LED absorbiert und vernichtet. Dieses einfach anmutende Problem der internen Totalreflexion beschäftigt die LED Entwickler seit nunmehr fast 50 Jahren.

Blaue LED Schichten werden auf Saphir-Wafer aufgewachsen. Saphir ist kristallines Aluminiumoxid und hat für die Lichtauskopplung den großen Vorteil für sichtbares Licht transparent zu sein. LED Chips entstehen aus einem Wafer, indem dieser, zusammen mit der aufgetragenen LED Schicht, in sub-millimeter kleine Stückchen („Chips“) zersägt wird. Man kann sich diese Chips wie lauter kleine, transparente Würfelchen vorstellen. Auch wenn nur die dünne Oberflächenschicht eines Würfels das Licht erzeugt, leuchten doch alle seine Seiten und tragen damit zur Lichtauskopplung bei. Diesen Vorteil können rote

LEDs nicht so einfach nutzen. Sie werden auf Galliumarsenidscheiben aufgewachsen, die das sichtbare Licht absorbieren. Damit die Seiten des LED Chips wenigstens geringfügig zur Lichtauskopplung beitragen können, wird häufig die LED Schicht sehr viel dicker aufgewachsen, als es für die Lichterzeugung notwendig wäre. Ein führender LED Hersteller hat es sogar gewagt, diese dicke LED Schicht von ihrem absorbierenden Wafer abzulösen und auf ein transparentes Material aufzupressen. Das Verfahren ist aufwändig und teuer, erlaubt aber die Herstellung völlig transparenter, roter LED Chips. Ende der 90er Jahre wurden mit diesem Ansatz alle Effizienz- und Helligkeitsrekorde gebrochen. Trotzdem hat sich die Technologie nicht durchgesetzt.

1992 hatten amerikanische Wissenschaftler die Idee, zwischen LED-Schicht und Substratwafer eine Opferschicht einzubringen und diese später chemisch aufzulösen [4]. Damit war es möglich, die Epitaxieschicht von ihrem Substratwafer zu trennen und sie auf ein beschichtetes Substrat aufzukleben. Die Gruppe erzielte mit derart hergestellten, optisch angeregten Strukturen sensationelle Lichtauskopplungswerte, jedoch erwies sich das Verfahren wegen der extrem dünnen LED Schicht in der Praxis als untauglich. 1999 wurde diese Idee bei Osram in Regensburg wieder aufgegriffen. Anstatt die Epitaxieschicht erst abzulösen und dann zu übertragen, beschichtete man sie erst mit Metall und lötete sie dann auf einen zweiten Wafer auf. Erst in einem zweiten Schritt wurde der ursprüngliche Wafer abgelöst. Zurück blieb eine LED Schicht auf einem neuen Trägerwafer, allerdings nun mit einer dazwischen liegenden Metallschicht. Diese Metallschicht übernahm in der LED die Aufgabe eines eingebauten Spiegels, der alle nach unten laufenden Lichtstrahlen wieder zur Oberseite hin reflektierte. Damit war die Dünnschicht-LED Technologie geboren. Die ersten kommerziellen LEDs kamen 2001 in der Farbe rot auf den Markt. Später wurde die Technologie auf alle LED Farben und Materialsysteme ausgedehnt. Gleichzeitig wurde eine rasante Steigerung der LED Effizienz angestoßen, die bis heute anhält. Doch die neuen LEDs waren nicht nur effizienter, sondern hatten auch eine Reihe von sehr vorteilhaften Eigenschaften. So emittieren sie z.B. das Licht nur in eine Richtung, nämlich nach vorn, und sind damit für Anwendungen wie Autoscheinwerfer oder LED-Projektoren ideal geeignet. Die direktionale Emission der Dünnschicht-LEDs führt auch dazu, dass ihre Effizienz unabhängig von der Größe der LED Chips ist. Damit gelang es erstmalig, auch effiziente, große Chips (1mm²) herzustellen.

Von der LED zur „Light-Engine“

Keine andere Lichtquelle wandelt elektrische Leistung so effizient in sichtbares Licht um wie Leuchtdioden. Blaue und rote LEDs können mehr als 50% der eingespeisten elektrischen Leistung in Licht konvertieren. Hochleistungs-Chips mit einer Fläche von 1 mm² sind heute in der Lage, mehr als ein Watt elektri-

scher Leistung aufzunehmen und mehr als hundert Lumen weißes Licht emittieren. Doch eine Lichtmenge von 100 oder 200 Lumen reicht für viele Anwendungen nicht aus. Eine 75W Glühlampe ist zwar nicht effizient, erzeugt aber problemlos 800 Lumen weißes Licht. Für viele Deckenstrahler werden einige tausend Lumen Licht benötigt. Um solche Lichtmengen mit LEDs erzeugen zu können, muss man viele LEDs zu einer Lichtquelle zusammenfassen. Hierbei können weiße und farbige LEDs, je nach Anwendung gemischt werden. Besonders interessant ist die Kombination weißer, roter und blauer LEDs in einem solchen Modul, denn damit kann die Farbtemperatur des weißen Lichtes nahezu beliebig eingestellt werden. Durch die Kombination von LEDs zu einer Lichtquelle hat man also nicht nur die erzeugte Lichtmenge erhöht, sondern auch noch eine bislang kaum mögliche Flexibilität in der Farbsteuerung gewonnen. Rüstet man ein solches Multi-LED Modul noch mit einer Ansteuerelektronik, einer Primäroptik und einer Kühlung aus und steckt alles zusammen in ein kompaktes Gehäuse, so ist man bei einer echten LED Lichtmaschine, neudeutsch „Light-Engine“ angelangt.

LED Light-Engines sind heute Gegenstand weltweiter, intensiver Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten. Primär geht es vor allen Dingen um die Steigerung der Performance im Hinblick auf Leistung, Effizienz und Lichtqualität. Die vielleicht größte Herausforderung besteht hierbei in der Entwärmung der LED Rückseiten. Während klassische Lampen die Energie, die sie nicht zur Lichterzeugung verwenden können, in Form von Wärme abstrahlen, bleiben die kleinen LED Chips buchstäblich darauf sitzen. So entstehen auf ihrer Rückseite Energiedichten, die deutlich über der von heißen Herdplatten liegen können. Leider macht sich eine hohe Temperatur negativ bei der Lichterzeugung der LED bemerkbar, ganz im Gegenteil zur Glühlampe.

Andere Herausforderungen betreffen die Qualität des emittierten Lichtes. Wie bereits angesprochen, wird häufig der weiße Farbton durch Mischung des Lichtes verschiedenfarbiger LED Chips erzeugt. Der Preis für die so gewonnene Flexibilität in der Lichtfarbe ist ein erhöhter Aufwand in der Lichtmischung um z.B. unangenehme Farbränder auf den beleuchteten Objekten zu vermeiden. Verwendet man in der Light-Engine nur weiße Chips und verzichtet aus Kostengründen auf die Möglichkeit der Farbsteuerung, dann gilt es, die richtige Farbtemperatur zu treffen. Hier sind die Anforderungen regional sehr verschieden. In Deutschland gibt es starke Präferenzen für warme Weißtöne, wogegen in den skandinavischen Ländern oder in weiten Teilen Asiens kaltes Weiß bevorzugt wird.

Light-Engines sind weit mehr als nur ein großes Gehäuse („package“) mit vielen LED Chips. Die integrierte Primäroptik sorgt für eine definierte Abstrahlcharakteristik. Thermisch leitfähige Materialien, sowie passive oder aktive Kühlelemente stellen eine ausreichende Kühlung sicher. Auch elektronische

Komponenten und Sensoren können auf demselben Board wie die LED Chips integriert werden. Eine derart „aufgerüstete“ Multi-Chip LED transformiert sich von einer simplen Lichtquelle zu einem multifunktionalen, intelligenten Beleuchtungsmodul, das weit mehr kann, als nur bestehende Lampen zu ersetzen.

Neue Möglichkeiten

Der Einzug der LEDs in die Allgemeinbeleuchtung hat bereits begonnen. LED Lampen in Glühlampenform sind überall im Handel zu finden. Anfänglich wurden mutige Konsumenten, die sich nicht durch die hohen Preise abschrecken ließen, häufig von geringen Lichtmengen, kalt-weißem Licht oder instabilen Farbtönen überrascht. Inzwischen hat sich die Qualität dieser Produkte deutlich verbessert, und einem Einsatz im Alltag stehen eigentlich nur noch die gewöhnungsbedürftig hohen Anfangsinvestitionen im Wege. Motiviert wird der Wechsel zur LED durch die Einsparung von Energie und die lange Lebensdauer. Doch nur mit dem reinen Ersatz von Glühlampen und Kompaktleuchtstofflampen würden zahlreiche neue Möglichkeiten zur Nutzung von Licht ungenutzt bleiben. Zwei dieser neuen Möglichkeiten, das Lichtmanagement und die Adaption auf biologische Wirkungen, werden im Folgenden kurz diskutiert.

Lichtmanagement

LEDs sind nicht nur effizient sondern lassen sich auch sehr schnell ein- oder ausschalten und in ihrer Helligkeit dimmen. Kombiniert mit integrierten oder externen Sensoren ergeben sich damit völlig neue Möglichkeiten für ein intelligentes Lichtmanagement. Bewegungssensoren oder einfache Kamerasysteme können Personen in einer beleuchteten Umgebung erkennen und diese Informationen nutzen um lokal die Beleuchtung anzupassen. Wo kein Licht benötigt wird, kann es ausgeschaltet, reduziert oder in der Farbwiedergabe verändert werden. Ein intelligentes Lichtmanagementsystem könnte z.B. auch erkennen, wo einfallendes Tageslicht bereits für eine gewisse Helligkeit im Raum sorgt, und lokal nur soviel Licht erzeugen, wie für eine definierte Beleuchtungsstärke gewünscht wird. Derart mitdenkende Lichtsysteme werden in Zukunft erheblich zur Einsparung von elektrischer Energie beitragen. Studien der Europäischen Kommission gehen davon aus, dass mit intelligentem Lichtmanagement etwa 40% des Energieverbrauchs für Beleuchtung eingespart werden könnten [5]. Dazu kommen weitere 30% Einsparung durch die hohe Effizienz heute schon verfügbarer, moderner Lichtquellen. Aufsummiert bis in das Jahr 2030 entspricht das einer Energieeinsparung von beachtlichen 1300 Terrawattstunden, d.h. man könnte auf den Bau von 650 größeren Kraftwerken (200MW) verzichten.

Bei aller Euphorie über mögliche Energie- und CO₂ Einsparungsszenarien sollte man nicht den Einfluss künstlicher Beleuchtung auf unsere Lebensqualität vergessen. Eine sich über den Tagesverlauf ändernde Beleuchtungsstärke und Lichtfarbe hat einen nicht unerheblichen Einfluss auf unser Wohlbefinden. Bislang beschränkte sich die Funktionalität unserer Beleuchtung auf das Ein- und Ausschalten, bestenfalls noch kombiniert mit einer einfachen Dimmbarkeit. In Zukunft wird uns eine Vielzahl neuer Möglichkeiten zur Verfügung stehen, um unser Licht manuell oder automatisch in Szene zu setzen. Die neuen Funktionalitäten werden aber auch die Beherrschung der Beleuchtung komplizierter machen. Der einfache Lichtschalter wird zum Steuergerät. Die einfache Steuerung eines immer komplexer werdenden Systems wird also auch in der Beleuchtung zur Herausforderung.

Biologische Wirkung von Licht

Vor drei Milliarden Jahren entstanden frühe Lebensformen auf der Erde. Die Geschichte menschlichen Lebens ist etwa zweihundert bis fünfhunderttausend Jahre alt. Seit etwa hunderttausend Jahren kennt der Mensch das Feuer und kann es nutzen. Unsere biologischen Funktionen sind, wie bei fast allen Lebensformen auf der Erde, geprägt von einem regelmäßigen Wechsel von Tag und Nacht. Die letzten hundert Jahre, in denen uns elektrische Beleuchtung zur Verfügung stand, spielen auf dieser Zeitskala keine Rolle. Unsere biologische Uhr, unser zirkadianer Rhythmus, hat sich ausschließlich unter dem Einfluss natürlichen Lichtes entwickelt. Dagegen findet ein großer Teil unseres Lebens heute in künstlich beleuchteten Räumen statt. Deren Beleuchtung unterscheidet sich in vieler Hinsicht von natürlichem Tageslicht. Selbst an einem Tag mit schlechtem Wetter liegt die mittlere Beleuchtungsstärke im Freien bei mehreren tausend Lux, die einer elektrischen Innenbeleuchtung aber nur bei 500 Lux, also kaum mehr als helles Mondlicht. Seit Ende der 60er Jahre ist bekannt, dass Licht neben den visuellen auch nicht-visuelle Funktionen besitzt und z.B. unseren Wach-Schlaf Rhythmus beeinflusst. So produziert unser Körper bei Dunkelheit beispielsweise das Hormon Melatonin, das Müdigkeit und Schlaf stimuliert, während helles Licht die Produktion von Melatonin unterdrückt. Erst seit einigen Jahren ist bekannt, dass die spektralen Bestandteile des Lichtes durchaus unterschiedliche Wirkungen besitzen [6,7]. Diese Erkenntnis ging einher mit der Entdeckung eines dritten, nicht-visuellen Rezeptors im menschlichen Auge [8]. Das Aktionsspektrum des Lichtes, das die Stärke der biologischen Wirkung von Licht als Funktion der Wellenlänge beschreibt, unterscheidet sich signifikant von der visuellen Empfindlichkeitskurve des menschlichen Auges. Es weist ein deutliches Maximum bei blau (464 nm) auf und sinkt dann mit zunehmender Wellenlänge signifikant ab. Verkürzt könnte man sagen, dass eigentlich nur blaues Licht eine signifikante biologische Wirkung besitzt.

Hier gibt es einen interessanten Bezug zu der Art und Weise, wie LEDs weißes Licht erzeugen. Da LEDs grundsätzlich nur monochromatisches Licht produzieren können, muss zur Erzeugung von weißem Licht noch eine zusätzliche Konversion stattfinden. Dazu wird ein Lichtkonverter auf einem blau emittierenden LED Chip angebracht, der das blaue Licht absorbiert und in Form von gelbem Licht abstrahlt. Die Mischung des durchdringenden blauen Lichtes mit dem konvertierten gelben Licht ergibt weiß. Spektral gesehen besitzt das weiße Licht der LED einen schmalbandigen, blauen Anteil und einen breitbandigen Anteil im grün-gelben Bereich. Durch Variation der Dicke des Lichtconverters können die Intensitätsverhältnisse dieser beiden Spektralbereiche eingestellt werden. Wir haben also mit der LED eine Lichtquelle, bei der man die spektralen Blauanteile unabhängig vom restlichen Spektrum einstellen kann. Dies gilt insbesondere für die oben beschriebenen Light-Engines, die für diesen Zweck auch separat steuerbare, blaue LEDs enthalten können.

Mit etwas Phantasie kann man sich nun vorstellen, dass zukünftige Beleuchtungssysteme über den Tagesverlauf hinweg ihre Lichtfarbe ändern und z.B. den Verlauf des natürlichen Lichtes imitieren. Denkbar wäre auch, dass man den biologisch wirksamen Blauanteil in der indirekten Beleuchtung unabhängig von der direkten Beleuchtung eines Arbeitsplatzes regelt. Es gibt Indizien dafür, dass unser nicht-visueller Rezeptor im Auge nur für Licht empfindlich ist, das schräg von oben auf das Auge trifft. Die unterschiedliche Richtungsabhängigkeit der visuellen und nicht-visuellen Rezeptoren kann dafür genutzt werden, biologisch wirksames und visuell benötigtes Licht unabhängig voneinander einzustellen. Damit ist es, zumindest aus technologischer Sicht, möglich geworden, unserer zukünftigen LED Beleuchtung auch biologische Aufgaben, wie z.B. eine Zeitgeberfunktion für unsere biologische Uhr, zu übertragen. Im Zeitalter des „Solid State Lightings“, also der LED basierten Allgemeinbeleuchtung, wird es nun auch möglich, auf die unterschiedlichen Bedürfnisse verschiedener Altersgruppen in der Bevölkerung einzugehen. Ältere Menschen verlieren z.B. durch die Eintrübung ihrer Linsenkörper im Auge insbesondere an Sensitivität im blauen Spektralbereich. Es könnte sowohl für das visuelle Sehen, als auch für die biologische Taktung der inneren Uhr durchaus Sinn machen, für diese Zielgruppe den Blauanteil in der Beleuchtung etwas höher einzustellen, als für jüngere Menschen.

Diese Beispiele zeigen, dass die LED ein weit größeres Potential bietet, als nur das Ersetzen konventioneller Lichtquellen. Die am häufigsten angeführten Vorteile sind bislang die hohe und immer noch steigende Energieeffizienz, sowie die lange Lebensdauer der LEDs. Auch die Tatsache, dass LED Lichtquellen keinerlei giftigen oder umweltbelastenden Materialien enthalten ist ein vielfach diskutierter Vorzug. Unsere Vorstellung von Beleuchtung ist immer noch stark geprägt von einer der erfolgreichsten Innovationen des letzten Jahrtausends, der elektrischen Glühlampe. Solange LED Lampen versuchen, so auszu-

sehen wie Glühlampen, werden sie immer einen großen Teil ihres Potentials ungenutzt lassen. Das Einschrauben einer LED Lampe in milliardenfach verbauten Edison-Schraubsockel nimmt ihnen die Möglichkeit, ihre Potentiale auszuspielen. Wenn es uns gelingt, die Allgemeinbeleuchtung von überholten Standards zu befreien und die neuen Möglichkeiten einer andersartigen LED Beleuchtung zu nutzen, werden die Vorteile weit über eine reine Steigerung der Effizienz hinausgehen. Heute messen wir die Qualität unserer Lichtquellen in Lumen pro Watt, Prozent oder vielleicht noch mit der Farbwiedergabe oder einer Farbtemperatur. Das wird den vielen neuen Möglichkeiten zur Verbesserung unserer Lebensqualität durch eine intelligent gesteuerte, wie auch immer adaptive LED Beleuchtung nicht gerecht. Professor Mark Rea vom Rensselaer Polytechnic Institute in Troy, New York hat deshalb vorgeschlagen, neue Metriken für die Qualität einer Beleuchtung zu finden. Wie wäre es mit Glitzern pro Watt, visuelle Anziehung pro Watt, Wohlbefinden pro Watt oder schlicht und einfach Vorteile pro Watt? Licht ist auch Lebensqualität. Es ist davon auszugehen, dass die emotionalen Aspekte unserer Beleuchtung ohnehin eine größere Rolle spielen, als nur das „schlichte“ Einsparen von Energie. Eines ist jedoch sicher, mit den LEDs wird die Zukunft unserer Beleuchtung nicht langweiliger werden.

Referenzen

- [1] Markt und Technik, Juli 2010, Seite 30.
- [2] MORGEN, J.P. (03 March 2010): European Equity Research.
- [3] Der Spiegel, 49/1996, Seite 227.
- [4] SCHNITZER, I., E. YABLONOVITCH, C. CANEAU & T.J. GMITTER (1992): "Ultra high spontaneous emission quantum efficiency, 99.7% internally and 72% externally, from AlGaAs/GaAs/AlGaAs double heterostructures." Appl. Phys. Lett., vol. **62**: 131–133.
- [5] ICT for Energy Efficiency, DG-Information Society and Media, Ad-Hoc Advisory Group Report, Brussels, 24.10.2008.
- [6] BRAINARD, G.C., J.P. HANIFIN et al. (2001): Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor. J. Neurosci. **21**: 6405–6412.
- [7] THAPAN, K., J. ARENDT & D.J. SKENE (2001): An action spectrum for melatonin suppression evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor, system in humans. The Journal of Physiology **535** (1): 261.
- [8] BERSON, D.M., F.A. DUNN & M. TAKAO (2002): Phototransduction by Retinal Ganglion Cells That Set the Circadian Clock. Science **295**: 1070.